

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA EM INTERFACE DE CORPO DE PROVA METALOCERÂMICO

Lívia Goulart Tovar

Projeto de Graduação apresentado ao curso
de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte necessária à obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Fernando Pereira Duda

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA EM INTERFACE
DE CORPO DE PROVA METALOCERÂMICO**

Lívia Goulart Tovar

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Fernando Pereira Duda (Orientador)

Prof. Luiz Carlos Pereira (Co-orientador)

Prof^a. Lavinia Maria Sanabio Alves Borges

Prof. Fernando Alves Rochinha

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2013

TOVAR, LÍVIA GOULART

Análise computacional de propagação de trinca em interface de corpo de prova metalocerâmico - Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

viii, 43.: Il.; 29,7cm.

Orientador: Fernando Pereira Duda.

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referência Bibliográficas: p.28.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai e à minha mãe,
Que sempre colocaram minha formação e as dos
meus irmãos em primeiro lugar, com muito
empenho e amor. Que me orientaram em todo o
momento para que eu chegasse a essa conquista;
Aos meus queridos irmãos e amigos, que estiveram
ao meu lado sempre dispostos a ajudar;
Ao meu namorado, Rodrigo Labanca, a pessoa que
mais acredita no meu sucesso profissional.

Dedico este trabalho com carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Fernando Pereira Duda, que acreditou na minha capacidade e me deu liberdade de seguir caminhos diversos, mas sempre colocando meus pés no chão.

Ao meu orientador Luiz Carlos Pereira, que me mostrou todos os passos necessários para a realização desse e de outros trabalhos, além de abordar o tema com bastante entusiasmo e dedicação.

À Carla Porto, que me mostrou novas técnicas de análise computacional, com uma agradável e proveitosa semana de trabalhos juntas.

Ao amigo Aldecir Araujo, que me motivou ao ajudar bastante nos primeiros passos.

Aos meus professores do curso de graduação, que possibilitaram o meu acesso a todo o conhecimento.

Aos meus colegas de turma, que estiveram comigo em todos os desafios.

A Deus pela minha existência e a de todos que citei anteriormente.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA EM INTERFACE DE CORPO DE PROVA METALOCERÂMICO

Lívia Goulart Tovar

Agosto/2013

Orientador: Fernando Pereira Duda

Curso: Engenharia Mecânica

Como complemento à análise experimental de diversos problemas encontrados na engenharia, a modelagem computacional tornou-se uma valiosa ferramenta de previsão de comportamento mecânico.

O problema aqui analisado trata o comportamento de materiais odontológicos para a confecção de restaurações dentárias, que são de grande interesse para a indústria.

É feita uma simulação de um ensaio de tenacidade à fratura de um corpo de prova composto por material metálico e cerâmico, com trinca posicionada na interface, através do *software* ABAQUS, da Dassault Systemes.

Através de tomada de dados dos registros de saída fornecidos pelo programa e do Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM) é calculado o valor de tenacidade à fratura (K_{Ic}) do corpo de prova e é feita a análise local de propagação de trinca.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF CRACK PROPAGATION AT THE
INTERFACE OF A METAL-CERAMIC SPECIMEN

Lívia Goulart Tovar

August/2013

Advisor: Fernando Pereira Duda

Course: Mechanical Engineering

As a complement to the experimental analysis of different problems faced in engineering, computational modeling has become a valuable tool for predicting mechanical behavior.

The problem analyzed here deals with the behavior of dental materials for making dental restorations, which are of great interest to industry.

A simulation of a test fracture toughness of a specimen composed of metallic material and ceramic, with crack positioned at the interface, was made using the software ABAQUS, Dassault Systemes.

By taking data output records provided by the program and the Extended Finite Element Method (XFEM) the value of fracture toughness (K_{Ic}) of the specimen is calculated and the local analysis of crack propagation is made.

Sumário

Folha de Rosto.....	i
Ficha Catalográfica.....	ii
Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. MOTIVAÇÃO	3
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1. MECÂNICA DA FRATURA.....	5
3.1.1. Mecânica da Fratura Linear Elástica.....	5
3.1.2. Determinação de K_{Ic}	7
3.2. MÉTODOS COMPUTACIONAIS	10
3.2.1. Módulos do Programa de Mecânica da Fratura	10
3.2.2. O Método XFEM	12
3.2.3. Modelagem de Dano	14
4. MODELO.....	17
4.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
4.2. ASPECTOS GERAIS	18
4.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	18
4.3.1. Materiais.....	18
4.3.2. Propriedades Declaradas no Modelo Computacional	19
4.4. GEOMETRIA	20
4.5. CONTROLES DA ANÁLISE PARA CONVERGÊNCIA (STEP).....	21
4.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO	21

4.7. MALHA.....	22
5. RESULTADOS.....	23
5.1. CÁLCULO DE K_{Ic}	23
5.2. ANÁLISE DE DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA.....	25
6. CONCLUSÕES.....	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
ANEXO	29
GUIA DE REPRODUÇÃO DO MODELO NO ABAQUS.....	29
Geometria	29
Materiais	31
Controles de Convergência.....	34
Montagem do Modelo	35
Interações.....	38
Carregamento.....	40
Malha.....	41
Cálculos	42
Resultados.....	42

1. INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento de pesquisas no campo das engenharias é muitas vezes necessária a utilização de ferramentas computacionais para validação de resultados experimentais. Através da simulação é possível utilizar um único modelo e nele mudar variáveis como geometria, material, condições de contorno e outras propriedades. Com isso, os custos com experimentos reais são reduzidos.

Aplicado a diversos problemas na área de engenharia mecânica, o estudo do comportamento de fratura na interface entre dois materiais é neste trabalho abordado através de uma ferramenta de análise computacional, ABAQUS, da Dassault Systemes.

O problema abordado refere-se à resistência mecânica e comportamento de fratura de materiais odontológicos utilizados para confecção de próteses dentárias. Muito se discute sobre quais materiais conservam a integridade do dente ao qual a prótese é implantada quando ele é submetido a esforços. Aqui é apresentada uma verificação de resultados experimentais obtidos nos estudos de uma dissertação de mestrado (FERNANDES, 2007). Um dos objetivos foi analisar os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{Ic}) com flexão em quatro pontos de cerâmica, de liga metálica e da junção (interface) desses dois materiais. Uma análise complementar refere-se ao caminho preferencial de propagação da trinca.

Uma característica inovadora refere-se ao tipo de corpos de prova confeccionados para esses ensaios. Estes substituíram microcorpos de prova que necessitam de uma usinagem fina, o que inviabilizavam execução dos ensaios.

Com o auxílio do *software*, é possível simular o ensaio de tenacidade à fratura (dobramento em 3 ou quatro pontos) com entalhe na região e analisar a propagação da trinca na interface, através da entrada de dados, especificar a tenacidade à fratura na interface dos dois materiais. Desse modo é possível fazer uma comparação entre os resultados obtidos pelo método computacional, e aqueles da dissertação e da literatura.

A verificação/comparação dos resultados dos modelos numéricos e laboratoriais permite uma análise do comportamento de fratura para diferentes configurações de junção de materiais distintos.

Este trabalho também tem como objetivos determinar os valores de tenacidade à fratura (K_{Ic}) numericamente e compará-los a resultados obtidos experimentalmente e também fazer uma análise local de propagação de trinca pelo método XFEM.

2. MOTIVAÇÃO

As próteses fixas feitas em metalocerâmica são constituídas de uma estrutura metálica recoberta por material cerâmico e podem ser feitas como coroas unitárias ou próteses extensas. Esse tipo de prótese vem sendo usada há mais de 40 anos e são bastante aceitas por dentistas e pacientes como um sistema confiável. Apesar disso, acredita-se que existe uma área de fragilidade na região de união (interface) entre os dois materiais, que se caracteriza pela presença de uma camada de óxidos (FERNANDES, 2007).

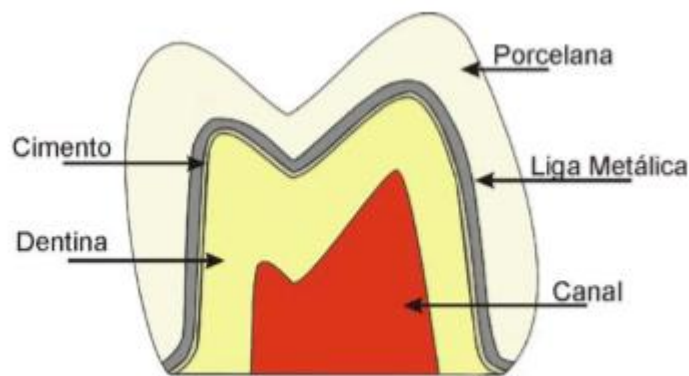


Figura 1- Desenho esquemático de uma coroa metalocerâmica cimentada em um dente (FERNANDES, 2007)

Mais recentemente surgiram as restaurações cerâmicas sem metal, com uma infraestrutura de cerâmica reforçada com alumina ou zircônia. Alguns autores obtiveram resultados de resistência à fratura compatíveis àqueles do sistema metalocerâmico.

O maior índice de falhas das próteses cerâmicas se deve à fratura. Em coroas unitárias metalocerâmicas as falhas se desenvolvem até a interface. Nas coroas cerâmicas livres de metal, as falhas acontecem com fraturas totais ou até catastróficas de maior extensão, podendo alcançar o dente (substrato). O uso de próteses metalocerâmicas possibilita o reparo após a fratura, o que aumenta a sobrevida das restaurações e podem ser utilizadas em próteses extensas, diferentemente das próteses livres de metal.

Os fatores mais comuns que levam a perda das próteses são: ranhuras ou riscos na superfície da cerâmica que irão atuar como concentradores de tensão; erros técnicos de aplicação da cerâmica; presença de vazios (cavidades internas) com bolhas internas ou camadas muito finas ou grossas de material cerâmico; erros técnicos de preparo do dente; falha no ajuste da prótese (que pode provocar uma distribuição de carga desequilibrada no dente e na restauração); hábitos do paciente que são incomuns como “bruxismo”, “apertamento dentário” ou outros que acentuem as tensões locais nos dentes restaurados (FERNANDES, 2007).

O polimento ou “glazeamento” do recobrimento de cerâmica ajuda no aumento da resistência mecânica do sistema, pois as irregularidades superficiais (que são concentradores de tensão) diminuem a resistência à fratura.

As primeiras cerâmicas utilizadas na odontologia possuíam um coeficiente de expansão térmica menor do que o material metálico. Isso dificultava a confecção de próteses metalocerâmica devido a presença de tensões residuais elevadas. Porém, após a introdução de leucita na composição da cerâmica em 1962, o coeficiente de expansão térmica da cerâmica ficou próximo ao do metal, minimizando este problema (FERNANDES, 2007).

A união dos materiais é feita com a formação de uma camada de óxidos entre o metal e a cerâmica durante o processo de sinterização. Essa camada deve ter uma espessura suficiente grossa para promover a adesão adequada, porém não o bastante para formar uma área de baixa resistência mecânica nessa interface.

O Ni-Cr é um dos metais mais utilizados na confecção das restaurações metalocerâmicas e isso se deve ao seu baixo custo, fácil fabricação, boas propriedades mecânicas e fluidez quando em fusão, o que facilita a elaborações dos detalhes das próteses.

Apesar de existirem indícios de que a perda de próteses fixas acontece devido à fratura da cerâmica de recobrimento, a forma como acontece essa fratura ainda não foi totalmente esclarecida, o que estimula os estudos mais aprimorados da mecânica da fratura com esses materiais, com a análise de tensões locais e utilização de métodos computacionais para o cálculo da tenacidade à fratura desses sistemas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. MECÂNICA DA FRATURA

A presença de descontinuidade em materiais estruturais pode ter diversas origens e dificilmente pode ser evitada. Os defeitos podem já estar contidos na matéria-prima, podem surgir ou se agravar se o componente for submetido a grandes solicitações mecânicas ou gradientes de temperatura, o que acontece em seu processo de fabricação, por exemplo, ou devido a aplicações cíclicas durante seu funcionamento/uso.

Para evitar falhas provocadas por presença de trinca pode-se utilizar coeficientes de segurança nos projetos, porém essa estratégia pode aumentar os custos de fabricação e em alguns casos resultar no aumento do peso dos componentes. Para muitos setores da indústria, como o caso da aeroespacial, esses dois parâmetros devem ser reduzidos, um pela melhoria de competitividade no mercado e o outro por condições de funcionalidade (ARAUJO, 2012).

A redução do volume (espessura) de material devido à diminuição dos coeficientes de segurança requer um maior conhecimento da influência da trinca em estruturas ou componentes mecânicos. Isso requer um maior conhecimento sobre a tolerância do material com trincas sem que ocorram falhas. Por conta disso a Mecânica da Fratura vem sendo incorporada como uma das metodologias de análise de comportamento de materiais e de diferentes condições de carregamento, temperatura e meio ambiente (ARAUJO, 2012).

3.1.1. Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) tem como base os fundamentos da teoria da elasticidade e, portanto, é aplicada a materiais lineares elásticos. Geralmente ela é aplicada a materiais frágeis, quando a plasticidade na ponta da trinca é muito restrita (ANDERSON, T.L, 1995).

Na abordagem desse problema sob condições da MFLE Irwin mostrou que as tensões ao redor da ponta da trinca são descritas pela equação

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots, \quad (\text{Eq.1})$$

em que r, θ são coordenadas cilíndricas de um ponto com relação à ponta da trinca.

K é a constante que evidencia o campo de tensões elástico localmente e é chamado *Fator de Intensidade de Tensões*. Análises dimensionais indicam que K deve ser linearmente proporcional à tensão e diretamente proporcional à raiz quadrada de uma dimensão de comprimento. A equação dada pelas análises de Griffth, feitas em um momento anterior às análises de Irwin, indicam que a característica de comprimento da equação é o comprimento da trinca e daí se tem a forma geral do fator de intensidade de tensão, dada por

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (\text{Eq.2})$$

em que $f\left(\frac{a}{W}\right)$ é um parâmetro adimensional que depende da geometria do corpo de prova e da trinca. O critério de falha é então dado por

$$\sigma \sqrt{\pi a} \geq \sigma_c \sqrt{\pi a} = K_c, \quad (\text{Eq.3})$$

O valor dessa constante (K_c) pode ser determinado experimentalmente ao se medir a tensão de fratura de uma grande chapa que contenha uma trinca passante de dimensão conhecida ou de outros corpos de prova de geometria conhecida. Além disso, pode ser usado para prever valores críticos de tensão, a partir das combinações de tensões críticas e tamanhos de trincas críticas. Isso é o que faz a utilização dessa abordagem tão poderosa. Além disso, o fator de concentração de tensão é também usado em processos de fratura subcrítica como fadiga e tensão de fratura com corrosão (EWALDS, H.L, 1986).

As tensões no entorno da trinca podem ser derivadas a partir dos três modos de carregamento, como ilustrado na figura 2.

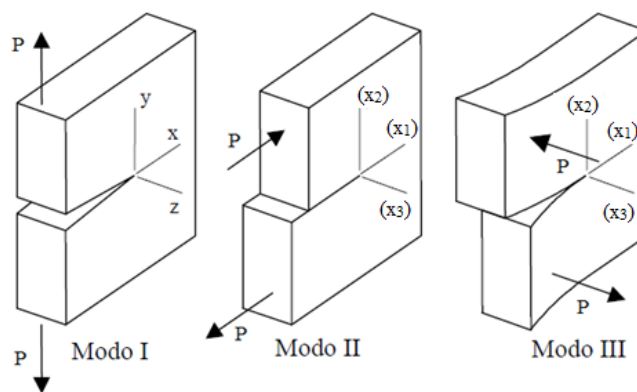


Figura 2- Os três modos de carregamento (ARAUJO, 2012)

O Modo I, que é o tratado neste trabalho, é o modo de abertura, o Modo II, de escorregamento, e o Modo III, de rasgamento (EWALDS, H.L, 1986).

3.1.2. Determinação de K_{Ic}

O fator de intensidade de tensão crítico, K_c é associado com uma geometria específica de trinca e pode ser utilizado para prever o comportamento de uma estrutura. Contudo, ele depende das condições como: temperatura do material, espessura do corpo de prova e condições de carregamento.

Acima de uma certa espessura, quando o material está no estado plano de deformações, o valor de K_c tende a um limite inferior e constante. Nessa condição a zona plástica à frente de trinca, que depende da espessura, do tamanho de trinca e do ligamento remanescente, é mínima, e assim o valor de K_c é dependente apenas do material (para aquela temperatura e taxa de carregamento). Assim K_c é igual a K_{Ic} , que é uma propriedade do material, porque não depende de variáveis geométricas. Depois de um considerável número de estudos e verificações experimentais, a Sociedade Americana de Teste e Materiais (*American Society for Testing and Materials* – ASTM) publicou um teste padrão de cálculo de K_{Ic} , - norma ASTM E399.

Um dos primeiros corpos de prova propostos por esta norma está ilustrado na figura 3.

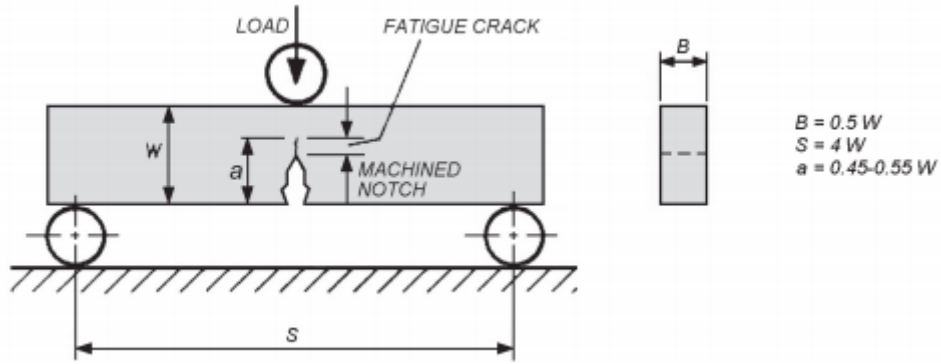


Figura 3-Ensaio de flexão padrão ASTM SENB (EWALDS, H.L, 1986)

O K_I especificado para esse corpo de prova é dado, de acordo com a norma, pela equação:

$$K_I = \frac{LOAD \cdot S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (Eq.4)$$

Sendo

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^3}, \quad (Eq.5)$$

Curvas de força versus deslocamento associados ao ensaio podem apresentar formas diferentes. Os principais tipos de diagramas estão ilustrados na figura 4

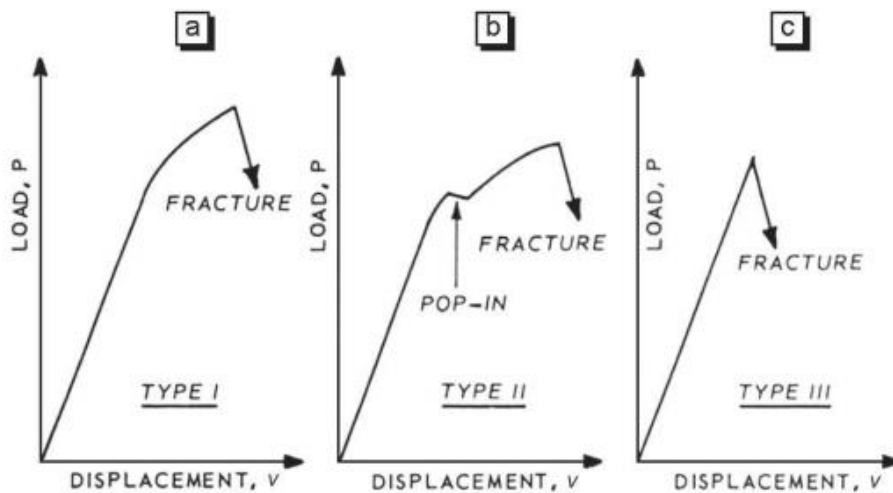


Figura 4- Principais tipos de curva força-deslocamento durante o teste de K_{Ic} (EWALDS, H.L, 1986)

Inicialmente o deslocamento cresce de forma linear com relação à força P . Em alguns casos, como no caso (a), há uma crescente não linearidade, em outros, como no caso (b), há uma repentina pausa da fratura seguida de um comportamento não linear. Esses aspectos de não linearidade acontecem devido à deformação plástica e ao crescimento estável da trinca antes da rápida fratura. Se o material se comporta perfeitamente elasticamente, não há descontinuidades da curva, como observado no diagrama (c). Uma análise dos gráficos (Figura 5) estabelece condições adicionais para a escolha da carga associada ao evento de iniciação de fratura (P_Q), a qual deverá ser utilizada na equação (4).

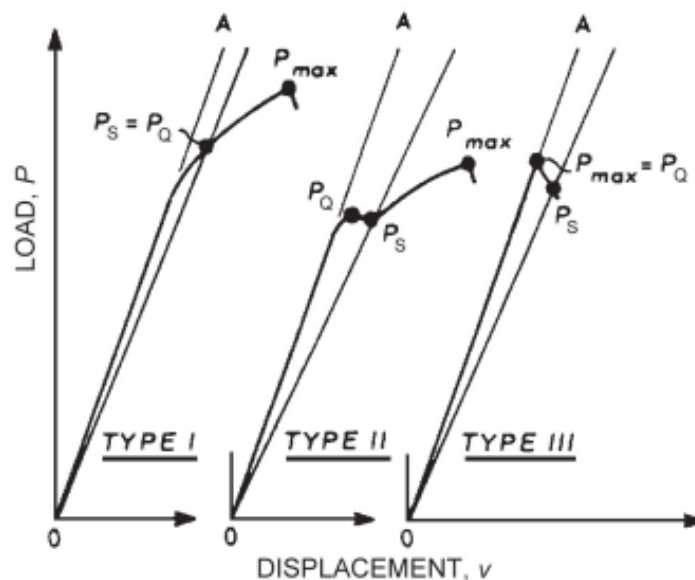


Figura 5-Determinação de P_S e P_Q (EWALDS, H.L, 1986)

A precisão com que K_{Ic} descreve o comportamento da fratura depende do quanto o fator de intensidade de tensão caracteriza as condições de tensão e deformação imediatamente a frente da trinca. Por isso existem algumas condições geométricas que o corpo de prova deve atender para que os efeitos da zona plástica possam ser negligenciados e o estado plano de deformação seja assegurado. Após diversas análises experimentais foram constatadas as dimensões mínimas do corpo de prova

$$\begin{cases} a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2, \\ B \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2, \\ W \geq 5,0 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2, \end{cases} \quad (\text{Eq.6, 7, 8})$$

em que σ_{ys} é a tensão de escoamento.

3.2. MÉTODOS COMPUTACIONAIS

Diversos problemas físicos são descritos matematicamente na forma de equações diferenciais ordinárias e parciais. Muitas vezes as soluções exatas tem origem em um método de solução analítico aplicados a geometrias e condições de contorno particulares. A aplicação generalizada dos métodos analíticos para essas diversas condições de contorno, tornam muito difícil a obtenção solução analítica exata.

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é a aproximação numérica com a qual as soluções das equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado (Fish, J, 2009). Engenheiros e cientistas de todo o mundo usam o FEM para prever comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico nas etapas de projeto e de análise de desempenho.

3.2.1. Módulos do Programa de Mecânica da Fratura

O programa utilizado no estudo é o ABAQUS/Standard. Ele oferece uma série de parâmetros para o estudo da Mecânica da Fratura baseados no Método dos Elementos Finitos (FEM) ou no Método Estendido de Elementos Finitos (XFEM).

São oferecidas duas maneiras diferentes de se calcular integrais de contorno. A primeira abordagem consiste no FEM, o qual necessita que a malha seja conformada à geometria da trinca, que seja definida explicitamente a frente de fratura, e que seja especificado a direção da propagação da trinca. O refinamento de malha é normalmente necessário e a obtenção dos resultados das integrais de contorno de uma maneira precisa. Para uma fratura numa superfície tridimensional isso pode

exigir recursos computacionais muito elevados por parte do programa. O XFEM minimiza essa consequência de aumento do tempo computacional, pois não necessita a compatibilidade da malha com a geometria da trinca e essa é uma das maiores vantagens do método. A existência da trinca é garantida por funções especiais enriquecidas, em conjunto com graus de liberdade adicionais. Essa abordagem também exclui a necessidade de definição da frente de propagação, bem como sua direção ao avaliar as integrais de contorno. Os dados necessários para seu cálculo são determinados automaticamente com base no conjunto de funções de distância nos nós de um elemento.

Muitas análises são possíveis em cada posição ao longo da trinca. Em um modelo de elementos finitos cada avaliação pode ser considerada como o movimento virtual de um bloco de material, em torno da ponta da trinca (em duas dimensões), ou em torno de cada nó ao longo da linha de trinca (em três dimensões). Cada bloco é definido por contornos, em que cada um forma um anel de elementos que contorna a ponta da trinca ou os nós ao longo da linha de trinca, de uma face até a outra da fenda. Esses anéis de elementos são definidos de maneira recursiva. Cada contorno faz uma avaliação da integral de contorno e o número de avaliações possíveis é igual ao número de anéis de elementos, que deve ser especificado, bem como o tipo de integral de contorno (Abaqus Analysis User's Manual).

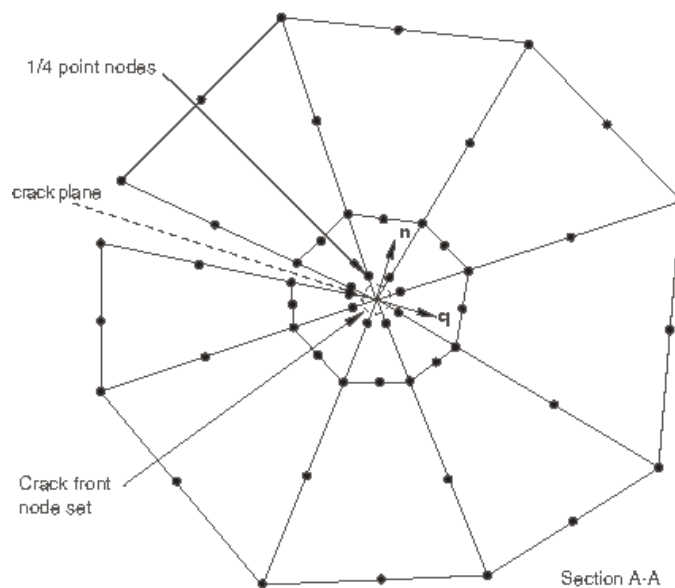


Figura 6- Típica malha em uma análise de mecânica da fratura pelo FEM (Abaqus Analysis User's Manual)

3.2.2. O Método XFEM

O recurso XFEM no ABAQUS pode ser usado tanto para representar trincas estacionárias quando em movimento. Ele permite simular a nucleação e o crescimento da trinca em um modelo com ou sem descontinuidade ou falha inicial. O conjunto de elementos a ele pertencente é enriquecido com funções adicionais, para que possam se separar em caso de propagação da trinca. Para a análise de fratura, as funções de enriquecimento consistem em funções assintóticas próximas à ponta da trinca que capturam a singularidade ao redor e uma função descontínua que representa o salto de deslocamento entre as superfícies da trinca (Abaqus Analysis User's Manual).

Esse método é um recurso numérico poderoso, que vem sendo usado para calcular descontinuidades. Aplica-se uma unidade de partição (PU) ao método convencional de elementos finitos e com isso é possível enriquecer a solução (MOHAMMADI,2012). No modelo da trinca, as descontinuidades do deslocamento na ponta da trinca podem ser tratadas sem levar em consideração as superfícies da trinca como condições de contorno geométricas que concordem com as fronteiras dos elementos.

Ele utiliza o conceito do método sem malha (meshless) dentro do método de elementos finitos para modelar problemas de fratura que envolvem descontinuidades no deslocamento e singularidades no campo de tensões.

De acordo com as propriedades de unidade de partição, qualquer função g_k que satisfaça a condição (i) abaixo pode reproduzi-la para uma função qualquer ψ do domínio Ω_{PU} (ii):

$$\sum_{k=1}^m g_k(x) = 1; \quad (x \in \Omega_{PU}), \quad (i) \quad (Eq.9)$$

$$\sum_{k=1}^m g_k(x)\psi(x) = \psi(x); \quad (x \in \Omega_{PU}), \quad (ii) \quad (Eq.10)$$

Como as funções de forma satisfazem (i), ψ pode ser utilizada como função de enriquecimento local para campos variáveis no domínio Ω_{enr} .

$$\phi^{enr} = \sum_{i \in N_{enr}} N_i(x)\psi(x)a_i; \quad (x \in \Omega_{enr}), \quad (iii) \quad (Eq.11)$$

Em que N_{enr} é o conjunto de nós enriquecidos, N_i é a função de forma e a_i os graus de liberdade adicionais. Assumindo que as funções de enriquecimento ψ_m pertencem ao conjunto M , tem-se:

$$M = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\}, \quad (\text{iv}) \quad (\text{Eq.12})$$

A equação (iii) é então modificada para:

$$\phi^{enr} = \sum_{i \in N_{enr}} N_i(x) \left(\sum_{m \in M} \psi_m(x) a_{i_m} \right); \quad (x \in \Omega_{enr}), \quad (\text{Eq.13})$$

A aproximação do vetor função de deslocamento \mathbf{u} com unidades de partição enriquecidas é dada pela equação (Abaqus Analysis User's Manual):

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) [\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) \mathbf{b}_I^{\alpha}], \quad (\text{Eq.14})$$

Em que $N_I(x)$ são as funções de forma usuais. O primeiro termo entre colchetes, \mathbf{u}_I , é o vetor usual de deslocamento nodal associado à parte contínua da solução de elementos finitos e aplicável a todos os nós do modelo; o segundo termo é o produto entre o vetor de grau de liberdade nodal enriquecido, \mathbf{a}_I , e a função descontínua de salto, $H(x)$, entre as superfícies da trinca e é válido apenas para nós cortados pelo interior da trinca; e o terceiro termo é o produto entre o vetor de grau de liberdade nodal enriquecido, \mathbf{b}_I^{α} , e a função assintótica elástica de ponta de trinca associada, $F_{\alpha}(x)$, e é usado somente para nós cortados pela ponta da trinca.

Para superar problemas de compatibilidade entre o domínio enriquecido e o não enriquecido, se define uma zona de transição entre eles. Por consequência, quatro tipos de subdomínio são observados: O domínio de elementos finitos (FEM), o domínio dos elementos enriquecidos cortados pela trinca (He), a ponta da trinca (Tip) e a região de transição (Blend). O campo de deslocamento no XFEM pode ser então escrito como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{FEM} + \mathbf{u}^{XFEM}, \quad (\text{Eq.15})$$

$$\mathbf{u}^{XFEM} = \mathbf{u}^{Tip} + \mathbf{u}^{He} + \mathbf{u}^{Blend}, \quad (\text{Eq.16})$$

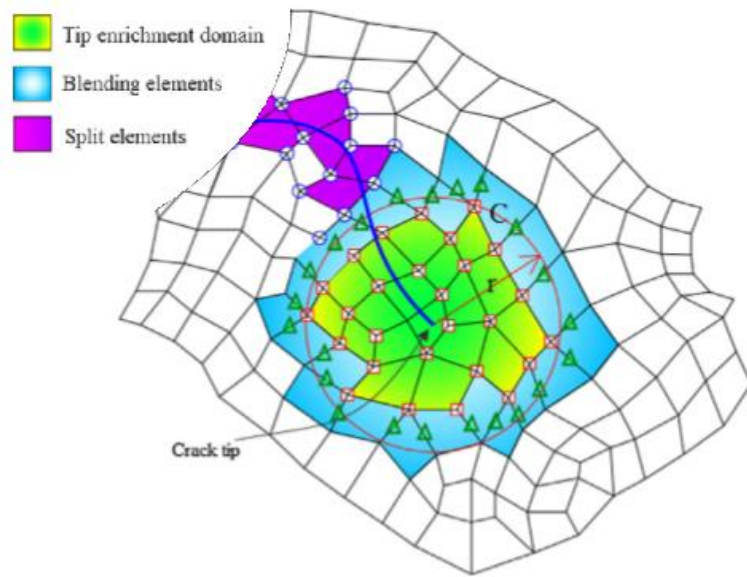


Figura 7- Definição dos vários elementos na modelagem de fratura com XFEM (Mohammadi, 2012)

3.2.3. Modelagem de Dano

A modelagem de dano permite a simulação de degradação e eventual falha de um elemento enriquecido. O mecanismo de falha consiste em dois fatores: um critério de iniciação de dano e uma lei de evolução do dano. A resposta é inicialmente linear, contudo, uma vez que o critério de iniciação do dano é atendido, ele pode ocorrer de acordo com a evolução de dano definida pelo usuário (Abaqus Analysis User's Manual).

O módulo de separação por tração do programa assume um comportamento inicialmente elástico linear seguido da iniciação de dano e de sua lei de evolução. O comportamento elástico é definido em termos de uma matriz elástica constitutiva que relaciona tensões normais e de cisalhamento com a separação normal e de cisalhamento do elemento rompido. O vetor de tração nominal \mathbf{t} , consiste nos componentes t_n , t_s , t_t (para problemas tridimensionais), as quais representam trações nominais e de cisalhamento respectivamente. A separação correspondente, denotada por δ_n , δ_s , δ_t . O comportamento elástico pode ser escrito como

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta}, \quad (\text{Eq.17})$$

As rigidezes normais e tangenciais não necessitam ser definidas, uma vez que a separação puramente normal não aumentam forças de coesão nas direções

cisalhantes, bem como escorregamento puro não aumentam forças coesivas nas direções normais. Os termos K_{nn} , K_{ss} e K_{tt} são calculados baseados nas propriedades elásticas dos elementos enriquecidos (Abaqus Theory Manual).

A iniciação da trinca se refere ao início da degradação do elemento coesivo, o qual é um tipo de elemento oferecido pelo ABAQUS para modelar situações em que a integridade e resistência de interfaces possam ser de interesse. O XFEM baseado no método de segmentos coesivos pode ser usado para simular o início de propagação ao longo de um caminho arbitrário, uma vez que ela não está ligada aos limites dos elementos da malha. Assim, a singularidade na ponta da trinca não necessita ser modelada e somente o salto de deslocamento através de um elemento rompido é considerado. O processo de degradação começa quando tensões e deformações satisfazem um critério de iniciação especificado.

O critério de Máxima Tensão Principal (maxps) pode ser representado como

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\}, \quad (\text{Eq.18})$$

$$\text{sendo } \begin{cases} \langle \sigma_{max} \rangle = 0, & \text{se } \sigma_{max} < 0 \\ \langle \sigma_{max} \rangle = \sigma_{max}, & \text{se } \sigma_{max} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Eq.19})$$

Em que σ_{max}^0 representa a máxima tensão principal permitida. Isso significa que um estado de tensões puramente compressivo não inicia dano. De acordo com o critério o dano inicia quando a taxa de tensão principal máxima atinge o valor igual a um (Abaqus Analysis User's Manual).

A lei de evolução do dano descreve a taxa a qual a rigidez de coesão é degradada uma vez que o critério de iniciação é satisfeito. Um escalar variável, D , representa a média do dano na interseção entre duas superfícies de trinca e os limites dos elementos rompidos. Inicialmente seu valor é 0 e evolui monotonicamente até 1 com o aumento da carga.

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)T_n, & T_n \geq 0 \\ T_n, & \end{cases}, \quad (\text{Eq.20})$$

$$t_s = (1 - D)T_s, \quad (\text{Eq.21})$$

$$t_t = (1 - D)T_t, \quad (\text{Eq.22})$$

Em que T_n , T_s e T_t são componentes de tensões normais e cisalhantes previstas pelo comportamento elástico de separação por tração para a separação analisada sem dano.

Para escrever a evolução do dano sob a combinação de separações normais e cisalhantes na interface, uma separação efetiva é dada como

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}, \quad (\text{Eq.23})$$

Muitos critérios foram propostos para prever o ângulo de propagação da trinca. Cotterel e Rice indicam sutis diferenças na previsão de ângulos iniciais de propagação de trinca entre esses critérios, porém todos implicam que $K_{II}=0$ na ponta da trinca, à medida que ela se propaga (Abaqus Theory Manual). O programa oferece três critérios para materiais isotrópicos lineares elásticos homogêneos: O critério de Máxima Tensão Tangencial, o de Máxima Taxa de Energia Liberada e o de $K_{II}=0$.

Sendo o campo de tensões ao redor da ponta da trinca dado pelas equações

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \left(K_I \cos^2 \frac{1}{2} \theta - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right), \quad (\text{Eq.24})$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta [K_I \sin \theta - K_{II}(3 \cos \theta - 1)], \quad (\text{Eq.25})$$

em que r e θ são coordenadas polares centradas na ponta da trinca em um plano ortogonal à frente da trinca, o critério de Máxima Tensão Tangencial propõe que a direção de propagação de trinca pode ser obtida, satisfazendo as condições de $\partial \sigma_{\theta\theta} / \partial \theta = 0$ e $\tau_{r\theta} = 0$, pela equação

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left(\frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right), \quad (\text{Eq.26})$$

em que o ângulo de propagação de trinca $\hat{\theta}$ é medido em respeito ao plano da trinca. $\hat{\theta} = 0$ representa a propagação de trinca na direção “para frente”. $\hat{\theta} < 0$, se $K_{II} > 0$ e $\hat{\theta} > 0$ se $K_{II} < 0$.

4. MODELO

4.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A simulação a seguir é uma representação do experimento descrito na dissertação (FERNANDES, 2007). Trata-se de um teste de flexão em quatro pontos para o cálculo de tenacidade à fratura na interface de dois materiais onde é localizada uma trinca.

Os ensaios são realizados em uma máquina universal (EMIC modelo DL-1000) na temperatura ambiente com deslocamento do travessão a uma taxa de 0,05mm/min. Obtidos os registros de deslocamento do travessão e da carga aplicada, os valores de carga máxima (P_f) são registrados para o cálculo de K_{Ic} .

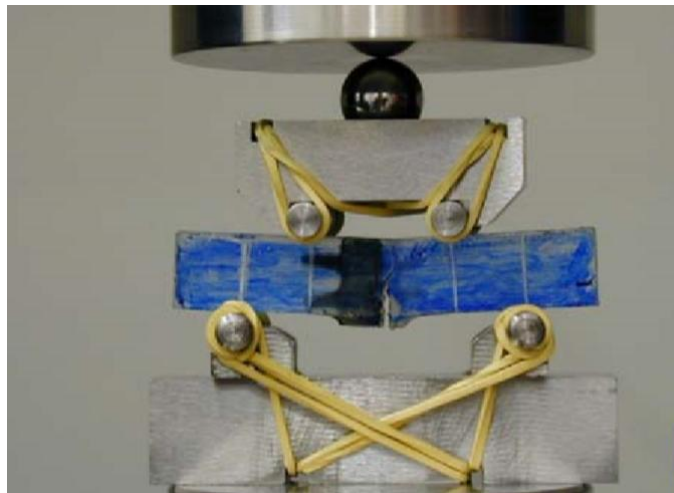


Figura 8 - Corpo de prova sob ensaio real de flexão em quatro pontos (FERNANDES, 2007)

Para fazer os corpos de prova no experimento real, é necessária a confecção de um molde nas dimensões do corpo de prova final, com um rasgo perpendicular na mediatriz de seu lado de maior dimensão. Introduz-se o conjunto metal-cerâmico, com uma lâmina posicionada em seu entalhe. Preenche-se o resto do molde com resina epóxi e após o tempo de cura da resina a lâmina é retirada.



Figura 9- Esquema do corpo de prova (FERNANDES, 2007)

4.2. ASPECTOS GERAIS

Para modelar esse problema, tendo em vista as propriedades dos materiais e os interesses desse estudo, o corpo de prova é considerado um corpo deformável. Devido a condições de simetria geométrica, de propriedades e de condições de contorno em relação ao plano XY, a análise é feita em duas dimensões.

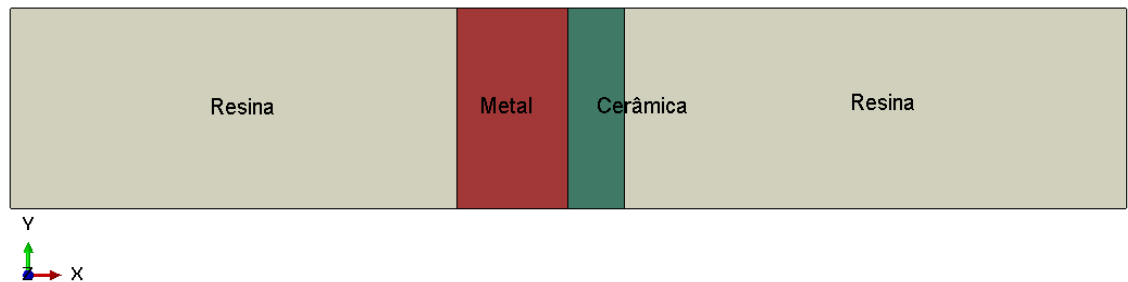


Figura 10- Desenho esquemático do modelo

Os cilindros, que não são o foco do problema, estão presentes apenas como locais onde se declara as configurações das condições de contorno e não devem influenciar os resultados do campo de tensões no corpo de prova, então são considerados corpos rígidos analíticos e não necessitam de informações de propriedade de material ou malha.

4.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades dos materiais foram fornecidas por seus fabricantes.

4.3.1. Materiais

O bloco metálico é confeccionado com uma liga de NiCr (liga WIRONIA-BEGO Bremer Goldschlägerei Wilh. Herbst GmbH & Co. KG, Alemanha), cuja composição química é mostrada na tabela 1.

Tabela 1- Composição da liga de Ni-Cr (FERNANDES, 2007)

Ni	59,6%
Cr	24,0%
Mo	9,8%

Para receber o bloco cerâmico o bloco metálico é submetido a tratamentos de superfície, com lixamento, jateamento com óxido de alumínio e ultrasom.

O sistema cerâmico utilizado para o trabalho descrito foi o VKM95-VITA (Alemanha), que é o material indicado para a confecção de trabalhos protéticos para uso odontológico em metal-cerâmica.

A resina utilizada para completar o molde do corpo de prova (resina epóxi nº 331, EPOXTEC, RJ, Brasil) não deve interferir nos resultados do cálculo da tenacidade à fratura na estrutura Ni-Cr/Cerâmica.

4.3.2. Propriedades Declaradas no Modelo Computacional

No modelo computacional, para análise de propagação da trinca com o método XFEM, é necessário, além das propriedades elásticas, como o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de poisson (ν), informações para a modelagem de danos dos materiais da interface, que no caso é a cerâmica e a liga de Ni-Cr. O critério de avaliação da iniciação do dano utilizado é, para o nosso modelo, o Critério de Máxima Tensão Principal (MAXPS), em que a iniciação do dano ocorre quando a máxima tensão principal atinge o valor crítico. Então é necessário declarar os valores de tensão de ruptura (σ_r) e, para a evolução do dano, os valores de tenacidade à fratura (K_{Ic}). Os valores desses parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades dos materiais

Material	Propriedades			
	E [MPa]	ν	σ_r [Mpa]	K_{Ic} [MPa \sqrt{m}]
Ni-Cr (metal)	200000	0,33	470	40
Cerâmica	91000	0,23	85	0,67
Resina	2952,76	0,3	-	-

4.4. GEOMETRIA

A modelagem computacional segue as dimensões adotadas para a confecção do corpo de prova do ensaio, de acordo com a norma ASTM E-399. Suas dimensões são 60x10,5x6,5mm, distância entre apoios da face superior de 20mm e da face inferior de 40mm.

O comprimento da trinca (a) é definido como metade da largura do corpo de prova, portanto igual a 5,25mm. Nesse modelo, a largura do bloco metálico e do cerâmico são diferentes, como sugerido na dissertação, de 6 e 3 milímetros respectivamente. Os apoios possuem o raio de 5mm, como permitido pela norma.

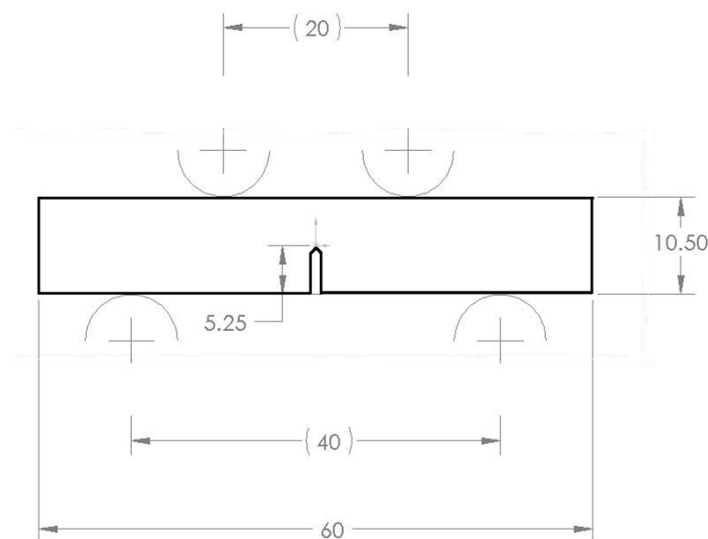


Figura 11- Desenho técnico do corpo de prova

$$W = 10,5mm,$$

$$B = 6,5mm,$$

$$L1 = 20mm,$$

$$L = 40mm,$$

$$a = 5,25$$

4.5. CONTROLES DA ANÁLISE PARA CONVERGÊNCIA (STEP)

Para a simulação de propagação de trinca é bastante importante definir os controles de análise para melhorar o comportamento da convergência. É necessário definir tamanho e quantidade dos incrementos.

Os parâmetros automáticos de incremento de tempo são definidos para alcançar um bom desempenho para a maioria dos problemas de comportamento linear. Para análises descontínuas, como no caso da propagação de trincas, o tempo de interação padrão pode resultar em cortes prematuros e finalização. Portanto é necessário configurar esses parâmetros para o caso de análises descontínuas e aumentar o valor do número de tentativas antes de abandonar o cálculo. (Tutorial Improving Convergence in XFEM Analysis).

No ensaio real o processo é interrompido quando a fratura acontece, o que corresponde a uma queda brusca e significativa no registro da carga. No modelo computacional, para análise da direção de propagação é necessário fornecer uma quantidade de incrementos suficientemente grande para que a trinca cresça com uma direção possível de ser observada.

4.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para simular o ensaio é necessário fornecer as condições físicas sob as quais o corpo de prova é submetido.

O ensaio em quatro pontos contempla quatro apoios: Dois cilindros que sustentam o corpo de prova e outros dois que são responsáveis por aplicar os esforços, na superfície superior.

No ensaio real, atribui-se uma velocidade de deslocamento vertical no travessão. O ensaio termina a mando do operador da máquina, quando há queda brusca nos registros de força. No modelo computacional é necessário apenas estipular um deslocamento dos cilindros superiores suficientemente grande para provocar crescimento de trinca, que no caso foi de 20 milímetros na direção vertical.

Associado aos dois cilindros inferiores se coloca um engaste. Ambas as condições, de deslocamento e engaste, são atribuídas a um ponto de referência localizado em cada centro de circunferência dos cilindros.

As propriedades de contato entre os cilindros e o corpo de prova são definidas automaticamente pelo programa.

Para estabilizar o problema de apoios cilíndricos, do ponto de vista do programa, coloca-se uma mola com rigidez bastante pequena que limita deslocamentos na direção horizontal. Esse é apenas um artifício para que não ocorram erros de penetração dos cilindros ou deslocamento do corpo de prova na direção horizontal.

4.7. MALHA

Os elementos selecionados na malha do modelo computacional devem ser quadriláteros, no caso da utilização do método XFEM. Nos locais em que há análise de propagação da trinca, próximos à interface, ela deve ser bastante refinada.

Na região da resina, onde não há interesse de análise, a malha é definida com elementos de 0,5 milímetros e nas regiões da cerâmica e do material metálico, elementos locais de 0,1 milímetros.

As configurações de elementos são definidas automaticamente pelo programa.

Os cilindros, por se tratarem de corpos rígidos analíticos, não necessitam de atribuição de malha.

5. RESULTADOS

5.1. CÁLCULO DE K_{Ic}

Para o cálculo de K_{Ic} é necessário obter informações de registro de força em função do deslocamento do travessão. No modelo computacional os valores de reação na direção vertical e de deslocamento dos pontos de referência dos cilindros superiores são obtidos em função do tempo. Com isso, é possível obter os dados em tabela, no próprio ABAQUS, e transferi-los para Excel.

Os registros de força e deslocamento são obtidos para os dois cilindros superiores. Faz-se uma média desses valores e obtém-se o gráfico de força em função do deslocamento.

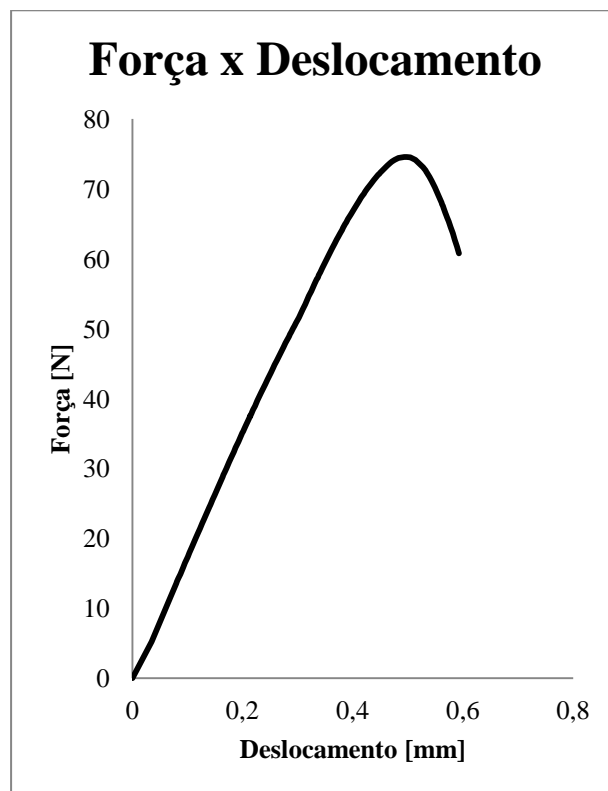


Figura 12- Curva PxV obtida em análise numérica

Com isso, é possível observar o comportamento da curva de tenacidade, que coincide com o encontrado na literatura. Com o maior valor de força registrado junto com os dados de geometria, é possível substituí-los na equação de K_{Ic} e obter seu valor.

$$K_{Ic} = \frac{P_f}{B.W^{1,5}} (L - L_1) \frac{3\sqrt{\alpha}}{2(1-\alpha)^{1,5}} \cdot Y' \quad (\text{Eq.27})$$

Sendo,

$$Y' = 1,9887 - 1,326\alpha - (3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2)\alpha(1 - \alpha)(1 + \alpha)^2, \quad (\text{Eq.28})$$

$$\alpha = \frac{a}{W}, \quad (\text{Eq.29})$$

Os valores das variáveis acima são dados pela tabela.

Tabela 3- Valores de variáveis e cálculo de KIC

Pf	74,5804 N
Y'	0,9382 mm
α	0,5 mm
L	40 mm
L1	20 mm
B	6,5 mm
W	10,5 mm
KIc	0,600308 MPa \sqrt{m}

Portanto, o valor de KIC do modelo computacional é

$$K_{Ic} = 0,6 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Para seu cálculo no experimento real, foram feitos 5 ensaios com corpos de prova idênticos e calculada a média dos valores obtidos, que são mostrados na tabela.

Tabela 4- Valores de KIC para 5 ensaios reais

	Metal-cerâmica [MPa \sqrt{m}]
1	0,40
2	0,49
3	0,38
4	0,56
5	0,38
Média	X = 0,44

Comparando-se os resultados do modelo computacional e real é possível constatar que eles são bastante próximos.

5.2. ANÁLISE DE DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA

Para a análise local de propagação de trinca foi necessário configurar alguns parâmetros de saída dos dados (outputs).

Além de variáveis de tensão e deformação padrão fornecidas pelo programa, pode-se definir as variáveis PHILSM, que descreve a distância entre superfície da trinca e a frente de trinca inicial e STATUSXFEM, que estabelece as condições de enriquecimento do elemento, em que 1.0 é relativo ao elemento completamente trincado e 0.0 se o elemento não contém trinca. Valores intermediários são relativos a elementos parcialmente trincados (Tutorial Defining an XFEM Analysis in Abaqus/CAE).

Os resultados demonstram graficamente que a trinca se propaga para o lado da cerâmica. As figuras 14 e 15 ilustram os resultados de PHILSM e STATUSXFEM no momento em que a força atinge seu valor máximo, no momento 0.024s, como ilustrado na figura 13.

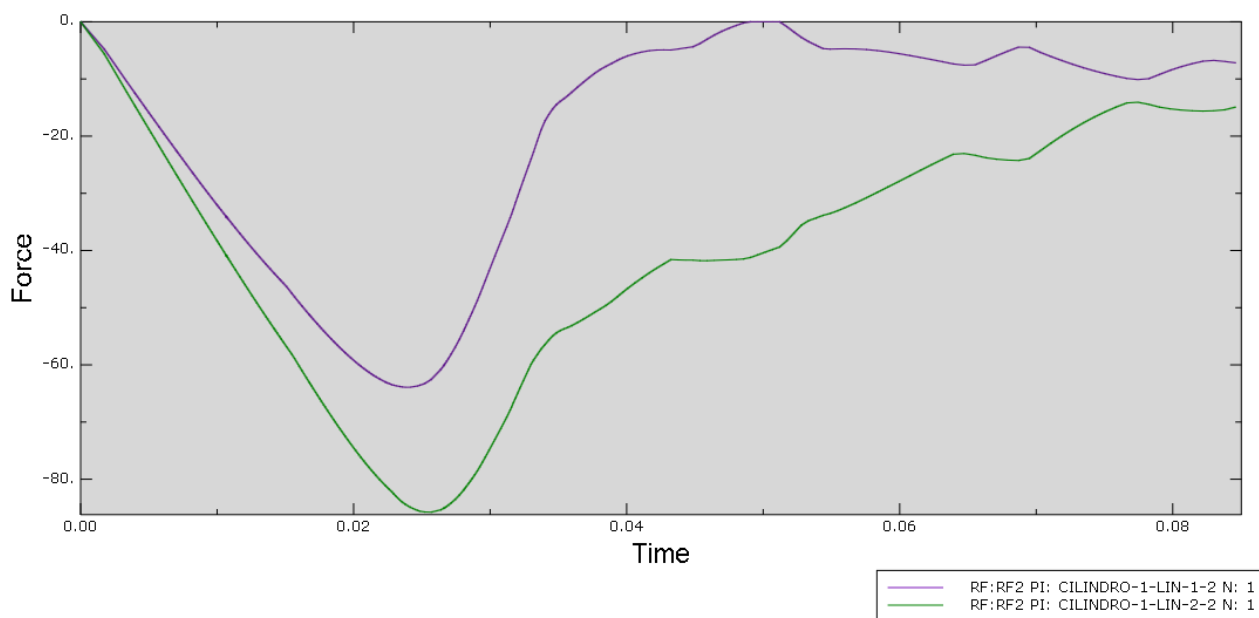


Figura 13- Registro Força x Tempo

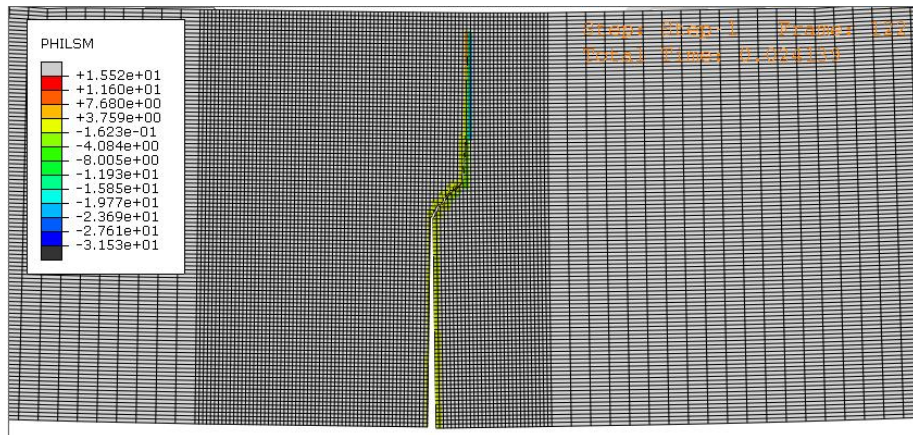


Figura 14- Resultados de PHILSM

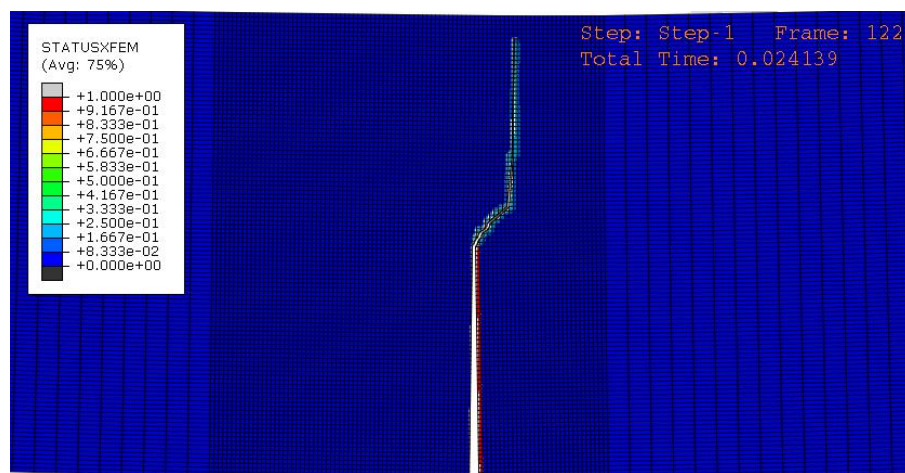


Figura 15- Resultados de STATUS XFEM

Assim como é observado nos resultados dos experimentos reais, uma vez propagada na direção da cerâmica, a trinca não se desvia para o lado da liga de Ni-Cr. Uma outra observação que pode ser feita é o fato do campo de tensões se distribuir de maneira diferente entre as regiões da cerâmica e do metal, como ilustrado na figura 16.

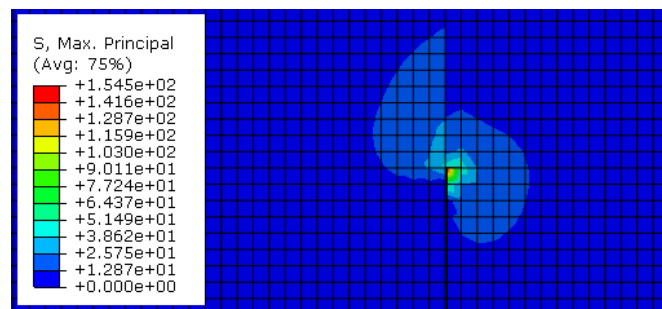


Figura 16- Máxima Tensão Principal na ponta da trinca

6. CONCLUSÕES

A partir dos dados analisados é possível fazer as seguintes conclusões:

1. Os valores obtidos de K_{Ic} do modelo computacional corroboram com os experimentais (FERNANDES, 2007), demonstrando ser um recurso confiável na análise desse tipo de problema. Eles possuem a mesma ordem de grandeza e sua diferença é esperada, à medida que os ensaios agregam erros e desvios de seus resultados, cuja média corresponde a um valor 36% menor que o numérico.
2. Como sugerido nos resultados experimentais, o caminho da propagação da trinca se dá para o lado do material cerâmico, e não para a interface, contrariando as suposições de alguns autores sobre a suposta fragilidade da região de junção dos materiais. Isso garante que a estrutura das restaurações e próteses dentárias não sofra uma fratura total, em caso de propagação de trinca, nem ofereça riscos ao dente do paciente, o que aumenta a confiabilidade do sistema metalocerâmico.
3. No início da propagação, na região da interface, as tensões são maiores no lado da cerâmica. Esse já é um indício do lado o qual a trinca irá se propagar. Além disso, fazendo uma análise local, conforme a propagação de trinca evolui, observa-se um aumento nas tensões principais na ponta da trinca enquanto a estrutura está sendo solicitada e em sequência seu alívio após o rompimento de cada elemento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus Analysis User's Manual, “Fracture Mechanics”, seção 11.4; “Modeling discontinuities as an enriched feature using the extended finite element method”, seção 10.7.1; “Defining the constitutive response of cohesive elements using a traction-separation description”, seção 31.5.6. Disponível em <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/books/usb/default.htm>. Acesso em 20 ago 2013.

Abaqus Theory Manual, “Prediction of crack propagation”, seção 2.16.4. Disponível em <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/books/stm/default.htm>. Acesso em 20 ago 2013.

ANDERSON, T.L., **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 2 ed., Florida, CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd., 1995.

ARAUJO, Aldecir Alves – “Tenacidade à fratura da interface recobrimento/metal de base em tubos caldeados” - COT 800 – seminário de doutorado, 2012.

EWALDS, H.L., WANHIL, R. J. H., **Fracture Mechanics**. 1 ed. Delftse U.M – Edward Arnold, 1986. P19,20,21

FERNANDES, Flavia Miguez - **Tenacidade à fratura no sistema NiCr/ Cerâmica feldspática utilizados em trabalhos protéticos odontológicos**, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007.

FISH, J., BELYTSCHKO, TED, **Um primeiro curso de elementos finitos**, Tradução e revisão técnica de Ricardo Nicolau Nassar Khoury – Rio de Janeiro, LTC, 2009. Tradução de *A first course in finit elements*.

MOHAMMADI, Soheil; BAYESTEH, Hamid – “XFEM fracture analysis of orthotropic functionally graded materials”, **Science Direct**, 2012.

ANEXO

GUIA DE REPRODUÇÃO DO MODELO NO ABAQUS

Ao abrir o programa, deve ser selecionada a opção *Standard/Explicit Model* e o modelo pode ser nomeado: clicar com o botão direito em *Model-1* → *Rename*.

O primeiro passo da análise é construir a os componentes do modelo.

Geometria

A geometria é definida no módulo “Part”.

Corpo de Prova:

Criar um *part*, nomeá-lo “Barra VM7” e selecionar as opções *2D Planar – Deformable* – *Shell – Approximate Size:100* → *Continue....*

Na construção do desenho,

- Selecionar o ícone retângulo *Create Lines: Rectangle (4 Lines)*;
- Desenhar um retângulo qualquer e dimensioná-lo com a dimensão horizontal em “60” e a vertical com “10.5”, através do ícone *Add Dimension*;
- Clicar em *Done*.

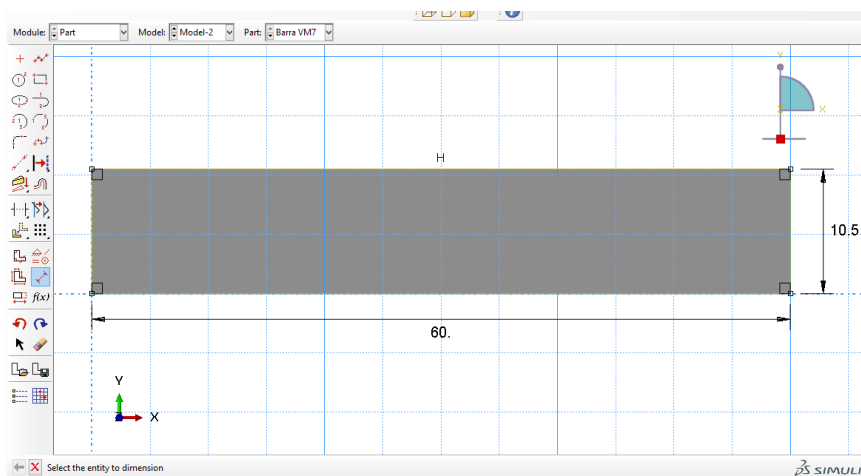


Figura 17-Construção do corpo de prova

Para definir as regiões dos materiais, clicar em *Partition Face*

- Desenhar 3 linhas verticais, através do ícone *Create Line : Connected* para separar as seções, sendo que uma deve ficar exatamente na metade do corpo de prova;
- Adicionar dimensões entre as outras duas linhas e as extremidades do corpo de prova. Da extremidade esquerda, a distância de uma das linhas deve ser de 24mm e da extremidade direita, a distância da outra linha deve ser de 27mm;
- Clicar em *Done*.

O resultado do desenho da barra é ilustrado abaixo:

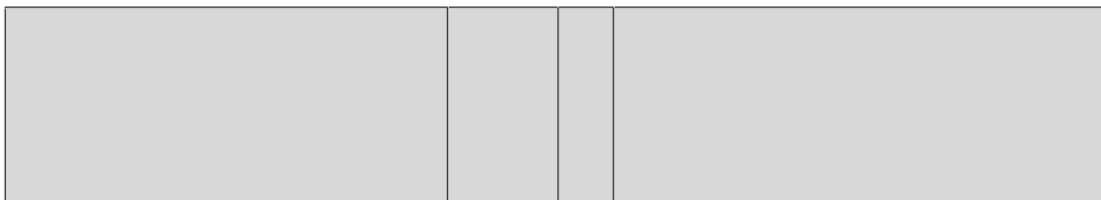


Figura 18- Resultado do desenho do corpo de prova

Pontos de Apoio:

Criar um *part*, nomeá-lo “Cilindro” e selecionar as opções *2D Planar – Analytical Rigid – Wire – Approximate Size:100 → Continue...*

Na construção do desenho,

- Selecionar o ícone circular *Create Arc: Center and 2 Endpoints*;
- Desenhar um arco de circunferência qualquer para cima, sem completar 180 graus e dimensioná-lo com a dimensão de raio de “2.5”, através do ícone *Add Dimension*;
- Clicar em *Done*;
- No Menu Principal, selecionar *Tools → Reference Point* e clicar no centro do arco.

Plano da Trinca

Criar um *part*, nomeá-lo “Crack” e selecionar as opções *2D Planar – Deformable – Wire – Approximate Size:100 → Continue....*

Na construção do desenho,

- Desenhar uma linha vertical, através do ícone *Create Line : Connected*;
- Adicionar a dimensão “5.25”, através do ícone *Add Dimension*;
- Clicar em *Done*.

Materiais

As propriedades dos materiais são definidas o módulo “Property”. Os cilindros e o plano da trinca não necessitam de declaração de propriedade, pois são corpos deformáveis. O corpo de prova é formado por 3 materiais.

Resina

Para declarar as propriedades da resina é necessário seguir os seguintes passos:

- Criar um material através do ícone *Create Material*;
- Nomeá-lo “Epoxi” no campo *Name* e, se necessário, descrever seu papel no campo *Description*;
- Selecionar *Mechanical → Elasticity → Elastic*;
- Manter os campos automáticos do programa;
- Declarar no campo *Young’s Modulus* o valor “2952.76” e no campo *Poisson’s Ratio* o valor “0.3”;
- Clicar em *OK*.

Metal

Para declarar as propriedades do material metálico é necessário seguir os seguintes passos:

- Criar novamente um material através do ícone *Create Material*;

- Nomeá-lo “Ni-Cr” no campo *Name* e, se necessário, descrever seu papel no campo *Description*;
- Selecionar *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*;
- Manter os campos automáticos do programa;
- Declarar no campo *Young’s Modulus* o valor “200000” e no campo *Poisson’s Ratio* o valor “0.33”;
- Selecionar *Mechanical* → *Damage for Traction Separation Laws* → *Maxps*;
- Manter os valores automáticos do programa;
- Declara no campo *Max Principal Stress* o valor “470”;
- Clicar na caixa *Suboptions* e selecionar *Damage Evolution*;
- No campo *Type* selecionar *Energy*;
- No campo *Mixed Mode Behaviour* selecionar *Power Law*;
- Clicar no campo *Power* e declarar o valor “1”;
- Nos campos *Normal Mode Fracture Energy*, *Shear Mode Fracture Energy First Direction* e *Shear Mode Fracture Energy Second Direction* declarar o valor “1264.91”;

Suboption Editor

Damage Evolution

Type:

Softening:

Degradation:

Mixed mode behavior:

Mode mix ratio:

☒ Power

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Data

	Normal Mode Fracture Energy	Shear Mode Fracture Energy First Direction	Shear Mode Fracture Energy Second Direction
1	1264.91	1264.91	1264.91

OK Cancel

Figura 19- Suboption Damage

- Clicar em *OK*;
- Clicar na caixa *Suboptions* e selecionar *Damage Stabilization Cohesive*;

- Declarar no campo *Viscosity coefficient* o valor “1E-005”;
- Clicar em *OK*.

Cerâmica

Para declarar as propriedades do material cerâmico é necessário seguir os seguintes passos:

- Criar novamente um material através do ícone *Create Material*;
- Nomeá-lo “Cerâmica” no campo *Name* e, se necessário, descrever seu papel no campo *Description*;
- Selecionar *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*;
- Manter os campos automáticos do programa;
- Declarar no campo *Young’s Modulus* o valor “91000” e no campo *Poisson’s Ratio* o valor “0.23”;
- Selecionar *Mechanical* → *Damage for Traction Separation Laws* → *Maxps*;
- Manter os valores automáticos do programa;
- Declara no campo *Max Principal Stress* o valor “85”;
- Clicar na caixa *Suboptions* e selecionar *Damage Evolution*;
- No campo *Type* selecionar *Energy*;
- No campo *Mixed Mode Behaviour* selecionar *Power Law*;
- Clicar no campo *Power* e declarar o valor “1”;
- Nos campos *Normal Mode Fracture Energy*, *Shear Mode Fracture Energy First Direction* e *Shear Mode Fracture Energy Second Direction* declarar o valor “21.18”;
- Clicar em *OK*;
- Clicar na caixa *Suboptions* e selecionar *Damage Stabilization Cohesive*;
- Declarar no campo *Viscosity coefficient* o valor “1E-005”;
- Clicar em *OK*.

Para atribuir os materiais à geometria, é necessário seguir os seguintes passos:

- Criar uma seção no ícone *Create Section*;
- Nomeá-la “Cerâmica” no campo *Name*;
- Selecionar as opções *Solid* → *Homogeneous*;

- Selecionar *Cerâmica* no campo *Material*;
- Clicar no campo *Plane stress/strain thickness* e declarar o valor “1”;
- Fazer o mesmo para os materiais *Ni-Cr* e *Epoxi*;
- Clicar no ícone *Assign Section*;
- Selecionar as regiões da resina no *view port*, que são as duas extremidades e clicar em *Done*;
- No campo *Section* selecionar *Epoxi*;
- Manter as outras opções automáticas;
- Clicar novamente no ícone *Assign Section*;
- Repetir o procedimento selecionando as regiões e as seções do *Ni-Cr* e da *Cerâmica*.

A configuração do material se dará conforme a imagem abaixo:

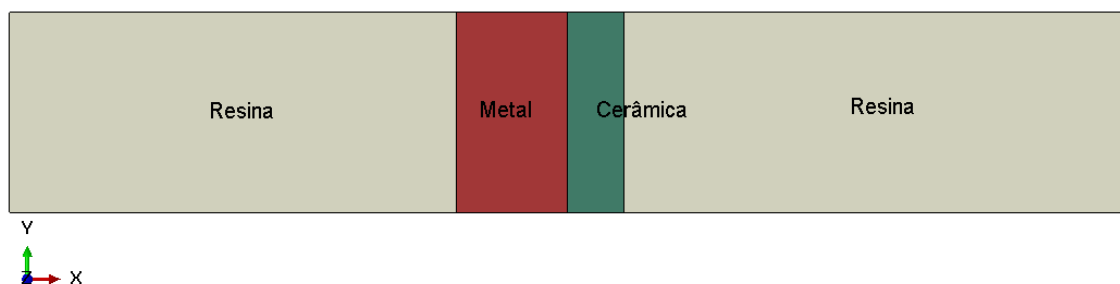


Figura 20- Configuração de materiais do corpo de prova

Controles de Convergência

Antes de montar o modelo, definir os controles para melhoria da convergência da solução no módulo *Step*.

- Criar “Step-1” através do ícone *Create Step*;
- Manter as seleções automáticas e clicar em *OK*;
- Na aba *Basic*, em *Nonlinear* escolher a opção *ON*;
- No campo *Automatic stabilization* selecionar a opção *Specify damping factor* e declarar o valor “0.0001”;
- Selecionar a opção *Use adaptive stabilization with Max. Ratio to strain energy* e manter o valor “0”;

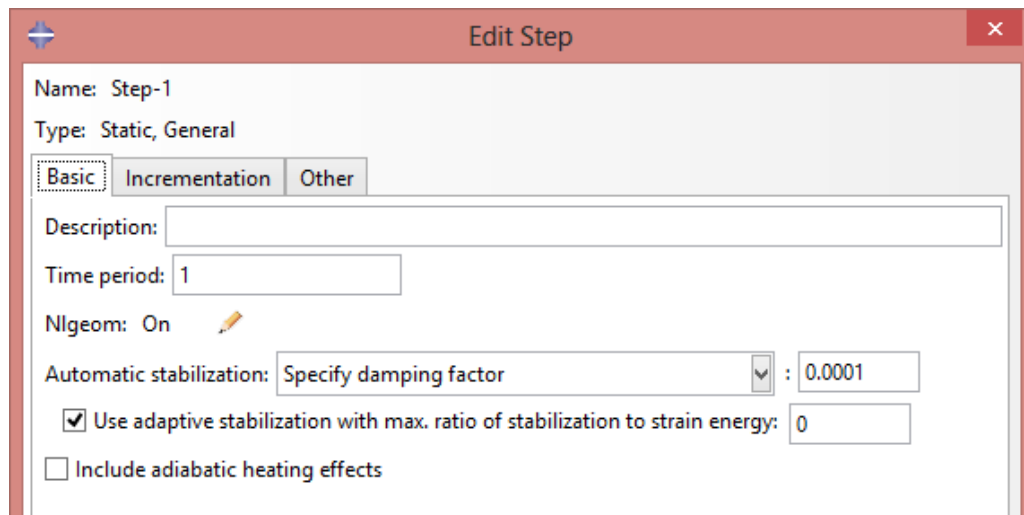


Figura 21- Aba "Basic" do Step editor

- Na aba *Incrementation* modificar o valor do campo *Maximum number of incrementation* para “250” e o valor do campo *Increment size Minimum* para “1E-012”.

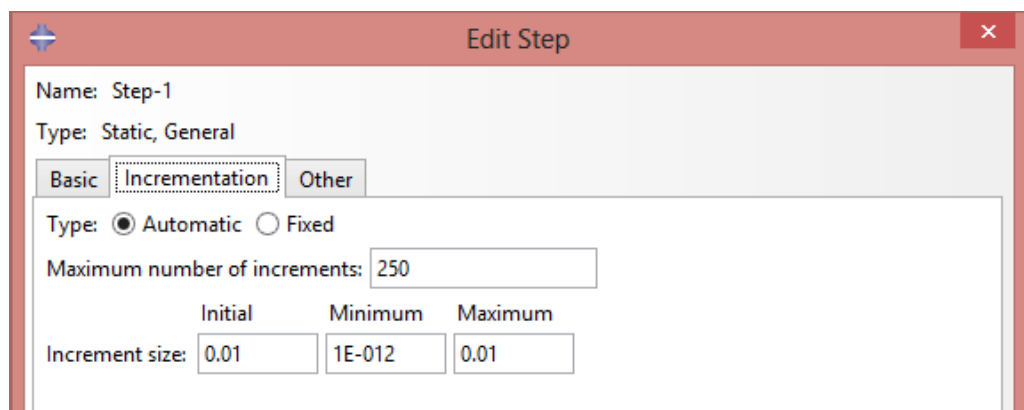


Figura 22- Aba "Incrementation" do Step editor

- Clicar em *OK*;

Nesse módulo é possível configurar os pedidos de saída do programa:

- Clicar no ícone *Field Output Manager* e editar “F-Output-1”;
- Manter os valores automáticos definidos pelo programa;
- Selecionar *Failure/Fracture* → *PHILSM, level set value phi*;
- Selecionar *State/Field/User/Time* → *STATUSXFEM, Status of xfem element*;
- Clicar em *Ok*.

Montagem do Modelo

A montagem do modelo se dá no módulo *Assembly*. Primeiramente chamam-se os componentes do modelo através dos passos abaixo:

- Clicar no ícone *Instance Part*;
- Selecionar *Barra VM7*;
- Selecionar *Dependent (mesh on part)*;
- Clicar em *Apply*;
- Selecionar *Crack*;
- Selecionar *Auto-offset from other instances*;
- Clicar em *Apply*;
- Selecionar *Cilindro*;
- Clicar em *Apply* 3 vezes;
- Clicar em *Ok*.

Para posicioná-los os seguintes passos devem ser seguidos:

- Posicionar o corpo de prova com referência na origem:
 - Clicar em *Translate Instance*;
 - Selecionar o corpo de prova;
 - Clicar em *Done*;
 - Clicar no ponto do vértice inferior esquerdo do corpo de prova;
 - Preencher o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “0,0”;
- Rotacionar 2 cilindros, a partir de seus pontos de referência (RP) em 180 graus:
 - Clicar no ícone *Rotate Instance*;
 - Selecionar um dos 4 cilindros;
 - Clicar em *Done*;
 - Clicar em seu ponto de referência (RP);
 - No campo *Angle of rotation* preencher com o valor “180”;
 - Clicar em *OK*;
 - Fazer o mesmo para um outro cilindro.
- Transladar os quatro cilindros para as suas posições, supondo que os dois cilindros côncavos para baixo sejam C1 e C2 e os cilindros côncavos para cima, C3 e C4:
 - Clicar em *Translate Instance*;
 - Selecionar C1;
 - Clicar em *Done*;

- Clicar no ponto mais alto do arco de C1, que irá tangenciar o corpo de prova;
 - Preencher o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “10,0”;
 - Fazer o mesmo com C2, preenchendo o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “50,0”;
 - Fazer o mesmo com C3 (selecionando o ponto mais baixo do arco), preenchendo o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “20,10.5”;
 - Fazer o mesmo com C4 (selecionando o ponto mais baixo do arco), preenchendo o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “40,10.5”.
- Posicionar o plano da trinca na interface:
 - Clicar em *Translate Instance*;
 - Selecionar o plano da trinca “Crack”;
 - Clicar em *Done*;
 - Clicar no ponto mais baixo do plano da trinca;
 - Preencher o campo *Select an end point for the translation vector—or enter X,Y* com “30.05,0” (observar que a trinca está deslocada para o lado da cerâmica) ;

Observar que se obtém a configuração de montagem ilustrada abaixo:

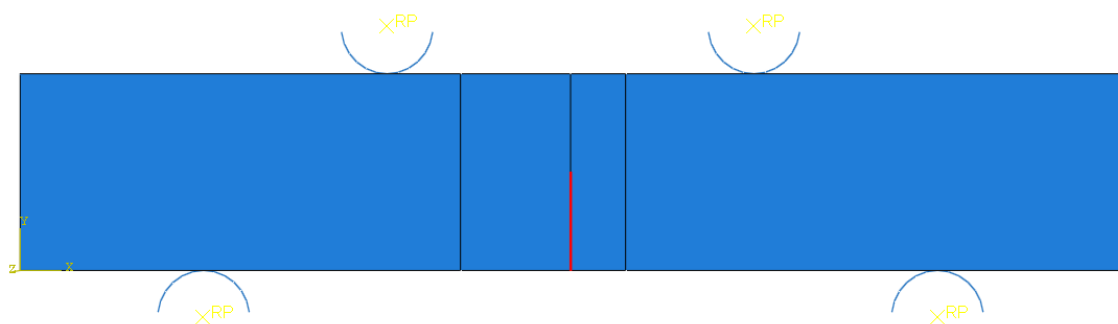


Figura 23- Configuração do Assembly

Interações

As interações entre os componentes do modelo são definidas no módulo “Interaction”. Para isso, é necessário criar propriedades de interação e estabelecê-las geometricamente através dos passos descritos abaixo:

- Criar a propriedade “IntProp-1”, clicando no ícone *Create Interaction Property*;
- Selecionar a opção *Contact* e clicar em *Continue...*;
- Clicar em *OK* (as propriedades de contato entre os cilindros e o corpo de prova serão definidas automaticamente);
- Criar a propriedade “IntProp-2”, clicando no ícone *Create Interaction Property*;
- Selecionar a opção *Contact* e clicar em *Continue...*;
- Selecionar *Mechanical* → *Normal Behavior* e manter as seleções automáticas;
- Selecionar *Mechanical* → *Geometric Properties*
- No campo *Out-of-plane surface thickness or cross sectional area (Standard)* declarar o valor “6.5”;
- Criar a interação “Int-1”, clicando no ícone *Create Interaction*;
- No campo *Step* selecionar *Step-1*;
- No campo *Type for Selected Step* selecionar *Surface-to-surface contact (Standard)*;
- Selecionar o arco de C1 para superfície mestra e clicar em *Done*;
- Selecionar a cor que representa a superfície externa do cilindro, que estará em contato;
- No requisito *Choose the slave type* selecionar *Surface*;
- Selecionar a aresta de contato do corpo de prova como superfície escrava;
- Clicar em *Done*;
- No campo *Contact interaction property* selecionar *IntProp-1*;
- Fazer o mesmo para os cilindros C2, C3 e C4, criando “Int-2,3 e 4”;

Para criar as propriedades de abertura de trinca, é necessário criar uma trinca:

- Criar “Crack-1”, selecionando no menu principal *Special* → *Crack* → *Create*, selecionar no campo *Type* a opção *XFEM* e clicar em *Continue...*;
- No campo *Select crack domain* selecionar as opções *geometric faces* e *individually* e clicar nas regiões da cerâmica e do metal;

- Clicar em *Done*;
- Selecionar a opção *Crack Location* e clicar no ícone *Edit...*;
- Selecionar o plano da trinca e clicar em *Done*;
- Selecionar a opção *Specify contact property* e selecionar *IntProp-2*;
- Clicar em *Ok*.

A configuração da seleção da trinca é ilustrada na figura abaixo:

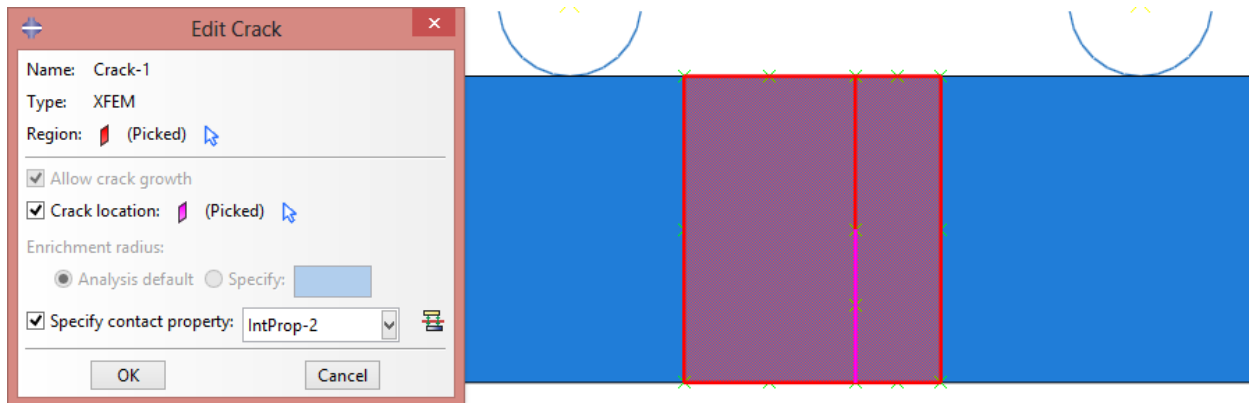


Figura 24-Seleção dos parâmetros de trinca

- Criar a interação “Crack”, clicando no ícone *Create Interaction*;
- No campo *Step* selecionar *Initial*;
- No campo *Type for Selected Step* selecionar *XFEM for crack growth*;
- No campo *XFEM crack* selecionar *Crack-1*;
- Selecionar *Allow crack growth in this step* e clicar em *Ok*;

Por uma questão de estabilização do problema coloca-se dois elementos de mola, com coeficiente de elasticidade bastante pequeno, através dos passos a seguir:

- Criar “Spring/Dashpots-1”, selecionando no menu principal *Special* → *Spring/Dashpots* → *Create*, selecionar no campo *Connectivity Type* a opção *Connect two points* e clicar em *Continue...*;
- Selecionar o vértice inferior esquerdo do corpo de prova;
- Selecionar o ponto de referência (RP) do cilindro inferior mais próximo;
- Clicar em *Done*;
- No campo *Axis*, selecionar *Follow line of action*;
- Selecionar em *Properties* a opção *Spring stiffness* e preencher o campo com o valor “0.001”;

- Clicar em *Ok*;
- Selecionar o vértice inferior direito do corpo de prova;
- Selecionar o ponto de referência (RP) do cilindro inferior mais próximo;
- Clicar em *Done*.
- No campo *Axis*, selecionar *Follow line of action*;
- Selecionar em *Properties* a opção *Spring stiffness* e preencher o campo com o valor “0.001”;
- Clicar em *Ok*.

A configuração das interações estará ao final com a configuração ilustrada abaixo:

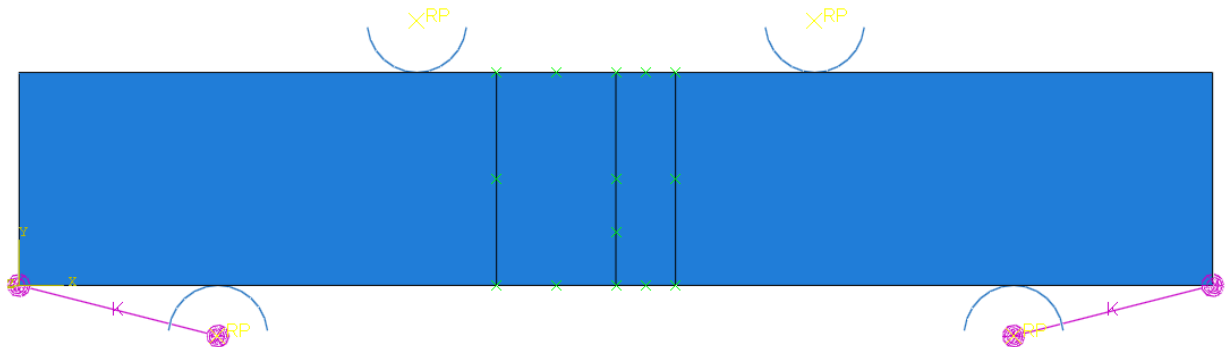


Figura 25- Configuração do Interaction

Carregamento

As condições de contorno são declaradas no módulo “Load”, onde são definidos parâmetros de carregamento e apoios.

- Criar a condição de contorno “BC-1”;
- No campo *Step*, selecionar *Step-1*;
- No campo *Category*, selecionar a opção *Mechanical*;
- No campo *Types for Selected Step*, selecionar a opção *Displacement/Rotation* e clicar em *Continue...*;
- Selecionar os pontos de referência dos cilindros C1 e C2 e clicar em *Done*;
- Selecionar os campos U1, U2 e UR3 e manter os valores “0” para cada um deles;
- Clicar em *Ok*;

- Criar a condição de contorno “BC-2”;
- No campo *Step*, selecionar *Step-1*;
- No campo *Category*, selecionar a opção *Mechanical*;
- No campo *Types for Selected Step*, selecionar a opção *Displacement/Rotation* e clicar em *Continue...*;
- Selecionar os pontos de referência dos cilindros C3 e C4 e clicar em *Done*;
- Selecionar os campos U1 e UR3 e manter os valores “0” para cada um deles;
- Selecionar o campo U2 e declarar o valor “-20”;
- Clicar em *Ok*.

A configuração das condições de contorno se dá como mostrado abaixo:

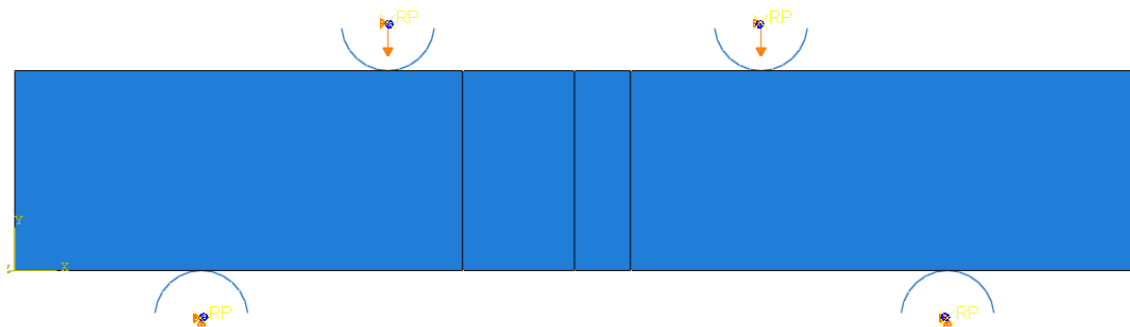


Figura 26- Configuração do Load

Malha

A definição dos elementos utilizados no cálculo numérico é definida no módulo “Mesh” e é feita como definido nos passos a seguir:

- No campo *Object* selecionar a opção *Part e Barra VM7*;
- Clicar no ícone *Seed Part*;
- No campo *Approximate global size* declarar o valor “0.5” e clicar em *Ok*;
- Clicar no ícone *Seed Edges*;
- Selecionar as regiões da cerâmica e do metal e clicar em *Done*;
- Na aba *Basic*, escolher a opção *By Size* no campo *Method*;
- No campo *Bias* selecionar a opção *None*;
- No campo *Approximate element size* declarar o valor “0.1”;
- Clicar em *Ok*;
- Clicar no ícone *Assign Mesh Controls*;
- Selecionar todo o corpo de prova e clicar em *Done*;

- No campo *Element Shape* selecionar a opção *Quad-dominated*;
- No campo *Technique* selecionar a opção *Free*;
- No campo *Algorithm* selecionar a opção *Advancing front e Use mapped meshing where appropriate*;
- Clicar em *Ok*;
- Clicar no ícone *Mesh Part* e em *Yes*;

Cálculos

Os parâmetros de cálculo devem ser declarados no módulo Job, como descrito nos passos abaixo:

- Clicar no ícone *Create Job*;
- Nomeá-lo “Ni-Cr_Ceramica”;
- No campo *Source* selecionar *Model* e clicar em *Continue...*;
- Clicar em *Ok*;
- No ícone *Job Manager*, clicar em *Submit*;
- Aguardar a conclusão do cálculo.

Resultados

Após a conclusão dos cálculos, ainda no módulo “Job”, selecionar a opção *Results* e então os resultados serão abertos no módulo “Visualization”.

Para analisar os resultados de propagação de trinca os passos abaixo devem ser seguidos:

- Clicar no ícone *Plot Contours on Deformed Shape*;
- No campo das ferramentas de *Field Output Dialog* selecionar as opções *Primary, PHILSM*;
- No menu principal selecionar *Animate → Time History*;
- Observar a propagação;
- Fazer o mesmo, selecionando *Primary, STATUSXFEM*.

Para obter os resultados de K_{Ic} , gráficos e tabelas podem ser gerados e editados, como descrito nos passos abaixo:

- Clicar no ícone Create XY Data;
- Selecionar ODB Field output e clicar em Continue...;
- Na aba Variables e no campo Position, selecionar a opção Unique Nodal;
- Nas opções oferecidas seguir o caminho *RF: Reaction Force* → *RF2*;
- Na aba Element/Nodes selecionar Pick from viewport;
- Clicar em Highlight itens in viewport;
- Clicar em Edit Selection;
- Selecionar os pontos de referência dos cilindros C3 e C4;
- Clicar em Plot;
- Observar o gráfico;
- No menu principal selecionar *Tools* → *XY Data* → *Edit* → *_RF2: RF2 PI: CILINDRO-1-LIN-1-2 N:1*;
- Obter os dados de reação do cilindro C3;
- No menu principal selecionar *Tools* → *XY Data* → *Edit* → *_RF2: RF2 PI: CILINDRO-1-LIN-2-2 N:1*;
- Obter os dados de reação do cilindro C4.